

На правах рукописи



УМАНСКИЙ Алексей Борисович

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО  
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ РУД ГИДРОГЕННЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Специальность 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и  
радиоактивных элементов

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена на кафедре редких металлов и наноматериалов  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Смирнов Алексей Леонидович  
Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Ремез Виктор Павлович  
кандидат технических наук  
Трощенко Виталий Георгиевич  
Ведущая организация: ОАО «Чепецкий механический завод», г. Глазов

Защита состоится «18» октября 2010 г. в 15 часов на заседании совета  
Д 212.285.09 при Уральском федеральном университете имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина по адресу 620002, г. Екатеринбург, ул.  
Мира, 19, зал учёного совета (И-420).

Ваш отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью, в двух  
экземплярах просим выслать по адресу: 620002, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина», учёному секретарю совета Д 212.285.09.

Факс (343) 374-54-91. Адрес электронной почты: jaaf@dpt.ustu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО  
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».  
Автореферат диссертации разослан «17» сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор химических наук, профессор



Л.Ф. Ямщиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Уран является одним из видов топлива для ядерной энергетики и рассматривается как стратегический материал для военных целей и обеспечения энергетической независимости. Доля России на мировом рынке низкообогащенного урана весьма существенна, а задача поддержания и дальнейшего увеличения объемов экспорта, являющегося важнейшим источником финансирования отрасли, остается первостепенной.

Процесс извлечения урана способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) протекает в условиях неопределенности геотехнологической информации о недрах, что зачастую негативно сказывается на стоимости капитальных затрат на строительство предприятия и текущих затратах на его эксплуатацию, следовательно проблема поисков путей оптимизации и снижения затрат сохраняет свою актуальность. Поэтому изучение геотехнологической среды в межскважинном пространстве и физико-химических процессов взаимодействия растворов с породой и полезным ископаемым, обоснование границ и порядка отработки является, по сути, самой главной задачей.

В связи с этим, помимо исследования физико-химических особенностей процесса, одним из направлений оптимизации и повышения эффективности извлечения урана способом СПВ может послужить применение математических методов моделирования, позволяющие получить более ясную и достоверную картину текущего состояния предприятия. Успешная реализации полученных моделей в цифровом виде на ЭВМ позволит привлечь большее количество исходных данных, увеличить степень их использования, обеспечит возможность оперативного составления альтернативных вариантов технологической отработки, ускорит принятие решений при проектировании, планировании и управлении производством.

## **Цель работы**

На основе физико-химических закономерностей протекания процесса выщелачивания урана и построенной цифровой модели месторождения, провести подбор оптимальных технологических параметров и схем размещения технологических скважин, обеспечивающих сокращение времени отработки технологических блоков и уменьшение потерь полезного компонента.

**Объект исследования** – геотехнологические комплексы добычи урана способом СПВ.

**Предмет исследования** – кинетика процесса выщелачивания урана и статистические методы оценки и прогнозирования минерально-сырьевых и технологических показателей на добывающих предприятиях.

## **Задачи исследования**

1 Исследовать кинетику выщелачивания урана из руд и на основе полученных физико-химических зависимостей определить оптимальные технологические параметры, интенсифицирующие процесс.

2 Используя существующие наработки в области статистики и геостатистики, разработать методику математического моделирования, позволяющих наиболее полно учитывать все основные свойства системы СПВ и получать информацию о взаимосвязях и закономерностях изменений геологических и технологических параметров с целью своевременного использования её для принятия решений планирования и управления в технологическом цикле. Разработать алгоритмы реализации полученной модели и на их основе создать автоматизированный программный комплекс обработки геотехнологических данных, удовлетворяющий основным требованиям, предъявляемым геоинформационным системам.

3 С помощью созданных программных средств построить цифровую модель месторождения урана, отрабатываемого способом СПВ и на её основе определить оптимальные параметры расположения сети технологических скважин.

### **Достоверность полученных результатов**

Проведенные расчеты, с использованием полученной модели и применением разработанных программных средств, показали высокую сходимость при сопоставлении результатов моделирования с известными фактическими показателями отработанных месторождений.

### **Научная новизна**

Разработана математическая модель обработки, анализа и интерпретации геотехнологических показателей месторождения, отличающаяся от традиционных методов интерполяции универсальной схемой моделирования, позволяющей рассчитать значение рассматриваемого атрибутивного признака (содержание, мощность, плотность и т.д.) в любой точке геопространства путем выявления области пространственной автокорреляции атрибута относительно рассчитываемой точки и построения в этой области самосогласующихся трендов, характеризующих изменения признака вдоль выделенных профилей.

### **Практическая значимость работы**

Разработанная на основе полученной модели, автоматизированная информационная система (АИС) «Геотехнология», с максимальной автоматизацией расчетов, позволяет принимать решения по планированию и управлению разработкой месторождения и подбирать оптимальные параметры схемы расположения технологических скважин и режимов отработки, что позволит интенсифицировать процесс, уменьшая время отработки эксплуатационных участков и снижая потери.

### **Личный вклад автора**

1 Усовершенствование способа расчета значения исследуемого признака в рассчитываемой точке по результатам определения области автокорреляции признака и выявления закономерности (тренда) его изменения по всем рассматриваемым направлениям.

2 Разработка алгоритмов реализации полученной математической модели в цифровом виде в соответствии предъявляемым требованиям, таким

как: малая трудоемкость считывания информации с первичных геолого-маркшейдерских материалов, универсальность, информативность и надежность.

3 Реализация полученных алгоритмов в виде программного комплекса АИС «Геотехнология», позволяющего максимально автоматизировать весь процесс построения модели, расчёт технологических параметров и подбор оптимальной схемы расположения технологических скважин.

### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на семинарах кафедры РМиН Физико-технического факультета УрФУ им. Б.Н. Ельцина; докладывались на XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург, 2007), на IV и V Международной научно-практической конференции по актуальным проблемам урановой промышленности (Алматы, Республика Казахстан, 2006, 2008), и на XV и XVIII международной научной конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 2008, 2010).

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 14 научных работах.

### **Структура диссертации**

Диссертационная работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включая 38 рисунков, 8 таблиц, и состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 121 источников отечественных и зарубежных авторов, 5 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** проводится обзор особенностей технологии физико-химического способа добычи полезных ископаемых и условия возможности ее применения, а также проводится анализ существующих разработок компьютерных систем для решения различных технологических задач.

Физико-химические способы добычи полезных ископаемых получили широкое промышленное применение в России и за рубежом. Наиболее перспективным является метод СПВ, который позволяет выщелачивать металл *in situ* – на месте залегания. Способ СПВ особенно перспективен для отработки месторождений, приуроченных к осадочным водоносным породам.

В процессе проведения работ по СПВ выявилось, что подземное выщелачивание через скважины сталкивается с рядом трудностей, что при отсутствии надежных методов контроля над движением рабочих растворов делает процесс СПВ трудно управляемым, а также осложняет геотехнологические расчеты его параметров.

В связи с этим исключительно большое значение имеет создание математических моделей обработки и анализа геотехнологических данных с последующей реализацией их в виде компьютерных программ, позволяющих проводить многоплановые эксперименты на ЭВМ с минимальными затратами времени. На базе таких экспериментов можно устанавливать новые закономерности, прогнозировать результаты и последствия отработки месторождений полезных ископаемых, провести оптимизацию технологии в целом.

В мировой практике имеется множество конкурирующих между собой интегрированных систем, некоторые из них получают определенное распространение на территории Российской Федерации при проектировании и эксплуатации месторождений. Однако, в результате экспертизы, проведенной в ЦКР Роснедра министерства природных ресурсов и экологии, был выявлен ряд недостатков, присущий всем предлагаемым программным продуктам:

- 1 ни одно программное средство не может претендовать на полноту охвата решаемых задач, характерных для конкретного предприятия;
- 2 значительное время на освоение;
- 3 значительное время на внедрение такого рода систем – общее время

внедрения, как правило, больше суммы времени на внедрение отдельных частей, решающих необходимый перечень задач,

4 колоссальный набор инструментов, входящих в программные пакеты, значительно увеличивающий их рыночную цену;

5 применяемые в них математические методики моделирования имеют 20 – 30-летнюю давность.

**Во второй главе** сформулированы требования, предъявляемые к модели месторождения, и проведен анализ основных инструментов геостатистики, используемых для создания моделей месторождений в подавляющем большинстве современных геоинформационных систем.

Математическая модель месторождения должна давать комплексное представление о месторождении, включающее пространственное размещение залежи и вмещающих пород (геометрические параметры), геологические, гидрогеологические и физико-механические свойства, характеристику сортов и технологических типов руд.

Можно выделить наиболее важные характеристики, предъявляемые к модели месторождения:

- точность — способность модели отражать первичную геологическую информацию с минимальной погрешностью;
- универсальность — пригодность для моделирования разнообразных горно-геологических условий и решения различных задач;
- информативность — возможность получения необходимого количества и перечня данных;
- надежность — возможность сохранения значений параметров и показателей и предотвращения ошибок в процессе обращения к модели.

Все современные компьютерные геоинформационные системы строят модели месторождений, используя в качестве математического аппарата геостатистику. Термин геостатистика применяется к специализированным ветвям прикладной статистики в качестве теории оценки пространственных переменных.



Основной инструмент геостатистики – *полувариограмма*, используется для определения пространственной корреляции между произвольно размещенными реальными данными наблюдений. Как только экспериментальная полувариограмма описана математической функцией, полученная модель может быть использована для оценки неизвестных значений исследуемого параметра в любой точке данного пространства. Эта процедура оценивания называется *крайгингом*.

Однако на практике применение геостатистики для решения геологоразведочных задач сталкивается с рядом проблем.

Первая и самая большая – то, что пространственная корреляционная функция оцениваемого массива остается неизвестной. Она обычно оценивается с помощью построения полувариограмм, которым подбирается та или другая стандартная модель. При этом интерпретация полувариограмм – вещь сугубо субъективная. Геостатистики разработали множество «правил» для интерпретации полувариограмм, но до сих пор это «искусство» остается в высокой степени субъективным.

Другая важная проблема – это предположение о стационарности исследуемых переменных, которое в большинстве случаев не соблюдается, поскольку зачастую в разных частях месторождения присутствуют трендовые отклонения от среднего, что делает невозможным применения точечного крайгинга, а использование универсального или других видов крайгинга приводит к сложным многократным расчетам с последовательным приближением к «истине», которая также является субъективной.

**В третьей главе** описана теоретическая разработка математической модели анализа пространственно-факторной связи геотехнологических данных, исключая выше обозначенные ограничения геостатистической теории.

Месторождение полезного ископаемого как объект геометризации состоит из отдельных горно-геологических, горнотехнических и других показателей (атрибутивных признаков) полезного ископаемого и вмещающих



$$[M_{mn}] = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & X_{m3} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Обозначив  $l$ , длину транзитивно передвигающегося по профилю интервала, разделяющего две его точки и измеряя эту длину количеством единичных интервалов, ограничим целочисленные значения  $l$  в пределах от 0 до  $n-2$ , то профильную матричную корреляционную функцию  $[k(l)]$  можно представить в виде произведения матриц

$$[k(l)] = \frac{1}{n-1-l} [M^-(l)] [M^+(l)]^T, \quad (3)$$

где  $[M^-(l)]$ ,  $[M^+(l)]$  – матрицы, получаемые из матрицы (2) в результате удаления  $l$  столбцов с левого края (знак минус) и, соответственно, - с правого края (знак плюс);  $T$  – знак транспонирования матрицы. Значения коэффициентов корреляции, составляющих матрицу (4), зависят от количества точек профиля, интервала  $l$  и характера распределения атрибутивных признаков вдоль профиля. КМФ имеет вид

$$k_{ij} = \begin{bmatrix} k_{11}(l) & k_{12}(l) & \dots & k_{1m}(l) \\ k_{21}(l) & k_{22}(l) & \dots & k_{2m}(l) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{m1}(l) & k_{m2}(l) & \dots & k_{mm}(l) \end{bmatrix} \quad (4)$$

КМФ содержат всю информацию о корреляционной структуре отдельных случайных признаков и их взаимосвязей. Она характеризует динамику взаимосвязей в зависимости от интервала разведки. В случае  $l=0$  из (4) получим симметричную матрицу коэффициентов корреляции, отображающую связь геоданных по совмещенным точкам профиля. По значению каждого коэффициента  $k_{li}(0)$  первой строки матрицы оценивают уровень пространственно-атрибутивной связи соответствующего признака. Повышенное значение указывают на наличие тренда, и тогда пространственно-атрибутивная связь распространяется на весь профиль. Низкое значение коэффициента отражает преобладание случайной компоненты в распределении признака по профилю. При этом

корреляционная связь существует лишь на ограниченном расстоянии, то есть в пределах интервала автокорреляции  $l_k$ . Интервал автокорреляции для выделенного атрибутивного признака с индексом  $i$ , определяется автокорреляционной функцией из известного соотношения  $k_{ii}(l_k)=0$ .

Вид распределения атрибутивных признаков вдоль профиля, в сопоставлении с координатным распределением, в пределах выявленного интервала корреляции, определяется построением самосогласованного тренда.

В соответствии с (1) любое из наблюдаемых значений признака  $X_i$  состоит из двух компонент, одна из которых  $f(X_i)$  – закономерная, т.е. трендовая составляющая, а другая  $\varphi(X_i)$  – случайная.

Трендовая компонента представляется алгебраическим полиномом степени  $p$ , состоящим из  $n$  членов.

Коэффициенты тренда могут иметь разную значимость в связи с относительной долей вклада каждого члена в его суммарный результат. В свою очередь в целом тренд описывает закономерность в изменении признака с некоторой погрешностью. Поэтому развитие тренда определяется двумя видами испытаний: внутренними по оценке значимости коэффициентов и внешними – на соответствие тренда поставленной информационной задаче.

Главной особенностью предложенной модели тренда являются внешние испытания, в процессе которых устанавливается степень его достаточности или направление дальнейшего развития. Испытания связаны с оценкой распределения случайной составляющей искомого признака вдоль каждого аргумента.

Случайная составляющая признака в точке  $i$  опорной сети определяется разностью

$$\varphi(X_i)=X_i-f(X_i) \quad (5)$$

Дисперсия признака  $\sigma^2_{случ}$  с учетом этой разности сравнивается с его дисперсией  $\sigma^2_{оптим}$ , обусловленной воспроизводимостью метода получения

признака в точке сети и влиянием незначимых структурных неоднородностей объекта вдоль каждого трендового аргумента. Соотношение

$$\sigma^2_{случ} \leq \sigma^2_{оптим} \quad (6)$$

является критерием, по которому оценивается степень самодостаточности, т.е. согласованности тренда. Величина  $\sigma^2_{оптим}$  устанавливается на основе анализа полувариограммы случайной составляющей признака вдоль каждого аргумента

$$\gamma(\Delta x) = \frac{1}{2n} \sum_i [\varphi(x_i + \Delta x) - \varphi(x_i)]^2 \quad (7)$$

где  $\Delta x$  – интервал между значениями аргумента  $x$  и  $x_i + \Delta x$ ;

$n$  – количество возможных интервалов  $\Delta x$  на множестве  $x_i$ .

В качестве оптимальной  $\sigma^2_{оптим}$  принимается дисперсия  $\sigma^2_{случ}$ , при которой минимумы полувариограмм, разделенные размерами значимых структурных неоднородностей объекта, близки к нулю или принимают заданную допустимо малую величину. Разделение значимых и незначимых структурных неоднородностей геотехнологических объектов и, соответственно, выделение случайной составляющей признака зависит от информационных требований, содержащихся в поставленной горно-геологической задаче.

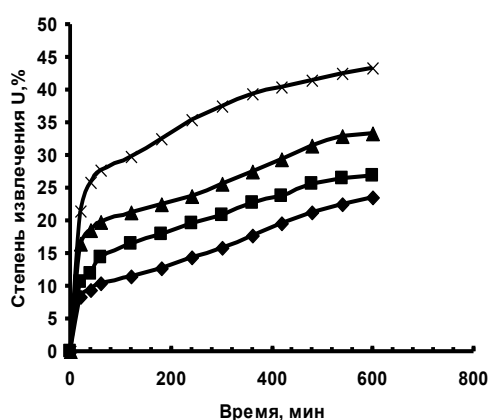
Искомое значение исследуемого признака в рассчитываемой точке, определяется по формуле:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^q \frac{z_i}{l_i^{p_i}}}{\sum_{i=1}^q \frac{1}{l_i^{p_i}}} \quad (8)$$

где  $Z$  – рассчитываемое значение в точке;  $z_i$  – значение в  $i$ -ом узле интерполяции;  $l_i$  – расстояние между рассчитываемой точкой и  $i$ -ым узлом;  $p_i$  – степень трендовой составляющей признака вдоль профиля  $i$ ;  $q$  – количество выделяемых профилей, включающих рассчитываемую точку.

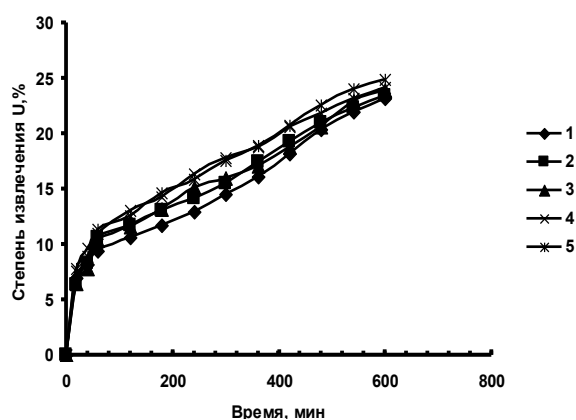
В четвертой главе исследованы основные кинетические закономерности выщелачивания урана из руд и разработаны алгоритмы реализации полученной модели в виде АИС «Геотехнология», с помощью которой была построена цифровая модель технологического блока, обрабатываемого способом СПВ, и определены оптимальные параметры сети расположения технологических скважин.

Для установления закономерностей кинетики выщелачивания урана из руды были проведены две серии испытаний при разных температурах и при различных концентрациях серной кислоты.



1 – 20°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C; 4 – 80°C

Рисунок 1 – Зависимость степени выщелачивания от времени при различных температурах и концентрации  $H_2SO_4$  10 г/л



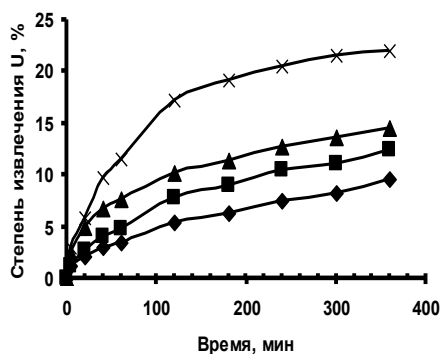
1 – 10 г/л  $H_2SO_4$ ; 2 – 20 г/л  $H_2SO_4$ ; 3 – 30 г/л  $H_2SO_4$ ;

4 – 40 г/л  $H_2SO_4$ ; 5 – 50 г/л  $H_2SO_4$ .

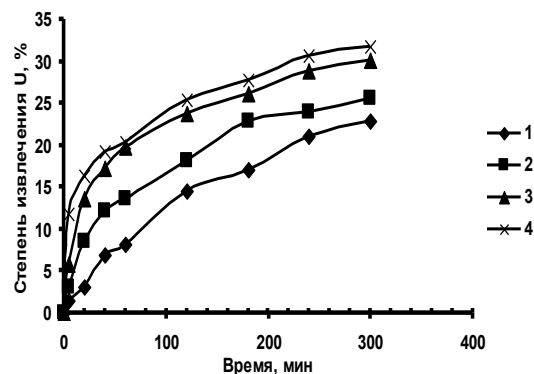
Рисунок 2 – Зависимость степени выщелачивания от времени при различных концентрациях исходного реагента и температуре 20°C

Как видно из графиков скорость выщелачивания урана сильно зависит от температуры, но не зависит от концентрации кислоты. Проведенные расчеты показали, что энергия активации  $E=43$  кДж/моль, а значение порядка реакции  $n \sim 0$ .

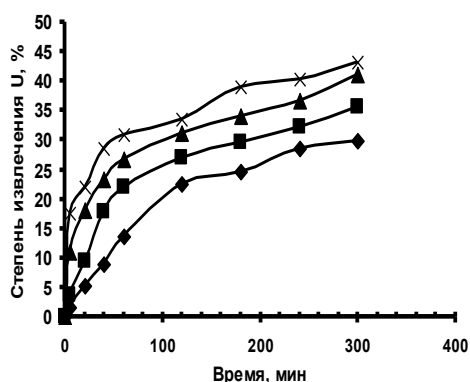
Известно, что присутствие  $Fe(III)$  в растворе существенно повышает степень извлечения урана  $\alpha$ , однако кинетика этого процесса до сих пор не была освещена. Чтобы выявить влияние присутствия железа в растворе на кинетику выщелачивания был проведен ряд модельных экспериментов по растворению  $U_3O_8$  при разных температурах с разными концентрациями  $Fe(III)$  в выщелачивающем растворе  $H_2SO_4$  10 г/л



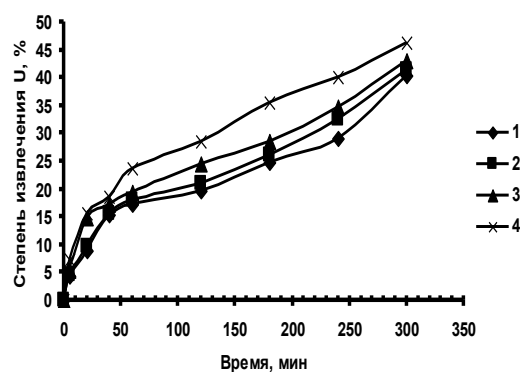
1 – 20°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C; 4 – 80°C  
Рисунок 3 – Зависимость степени  
выщелачивания урана из  $U_3O_8$  от времени



1 – 20°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C; 4 – 80°C.  
Рисунок 4 – Степень выщелачивания  
урана из  $U_3O_8$  (0,2 г/л Fe(III)) от времени



1 – 20°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C; 4 – 80°C.  
Рисунок 5 – Зависимость степени  
выщелачивания урана из  $U_3O_8$  (0,4 г/л Fe(III))  
от времени



1 – 20°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C; 4 – 80°C  
Рисунок 6 – Зависимость степени  
выщелачивания урана из  $U_3O_8$  (1,6 г/л Fe(III))  
от времени

Оптимальная концентрация железа (III) была установлена на основании  
следующих экспериментальных данных

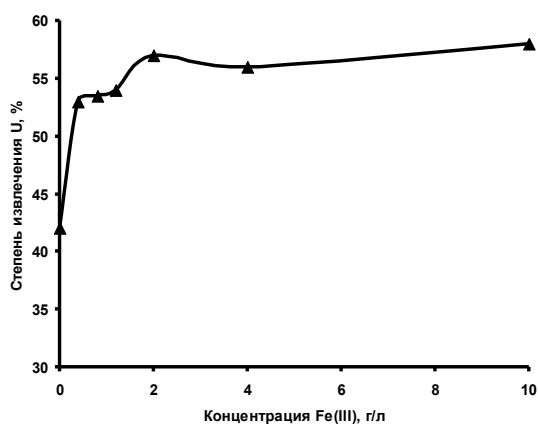


Рисунок 7 – Влияние концентрации Fe(III) на выщелачивание урана  
раствором с концентрацией  $H_2SO_4$  10 г/л.

Таким образом, на основании выявленных физико-химических особенностей процесса для интенсификации СПВ целесообразно применять окислители Fe(II) в оборотных растворах ПВ, поддерживая концентрацию Fe(III) на уровне 0,5-2 г/л. Увеличение скорости подачи раствора в пласт с одной стороны снизит диффузионное сопротивление, но с другой может привести к механической кольятации пород, что в еще больше замедлит процесс. Повышение кислотности (свыше 10 г/л) растворов ПВ также нецелесообразно ввиду выявленных кинетических закономерностей процесса.

Поскольку для таких систем нет возможности создания масштабных аналоговых моделей, то использование физико-химических методов моделирования не позволяет представить технологию СПВ по всей совокупности взаимосвязанных геотехнологических показателей месторождения, поэтому в плане дальнейшего поиска путей оптимизации и интенсификации технологии СПВ помимо физико-химического эксперимента, нужно прибегнуть к использованию математического моделирования и компьютерного эксперимента.

Разработанный программный комплекс АИС «Геотехнология», реализованный соответствии с вышеприведенной математической схемой моделирования пространственно-факторной связи геоданных, представляет собой объектно-ориентированное, многооконное, 32-х битное программное обеспечение и состоит из трех подсистем обеспечивающих обработку и интерпретацию данных в форматах 1D, 2D, 3D, т.е. решает задачи профильного, площадного и объемного моделирования соответственно.

С помощью данной информационной системы, на основе геотехнологических данных по скважинам, можно создавать двух и трехмерные цифровые модели месторождения или отдельных его частей (рисунок 8). Это позволит провести анализ геологической среды и технологических условий протекания процесса, осуществить прогнозирование показателей месторождения по базе первоначальных



данных, а в ходе поступления новых данных выдавать информацию необходимую для управления добычей, а также для выбора оптимальных схем расположения технологических скважин и режимов отработки. Всё это позволит значительно сократить времени эксплуатации, достигая при этом максимально возможной степени извлечения.

Таблица 1 – Оптимальные параметры для блока II-3-С<sub>1</sub>

Технологический блок II-3-С <sub>1</sub>	Радиус ячейки, м	Время закисления, сут.	Время эксплуатации, сут.	Кол-во скважин	Время эксплуатации при существующей схеме расположения скважин, сут.
Гексагональная схема	28	87	2233	60	5152
Рядная схема	32	92	2775	90	-

Для проверки достоверности информации, получаемой с использованием предложенной математической модели, и разработанной на ее основе информационной системы был проведен ретроспективный анализ отработанного месторождения (таблица 2). Результаты компьютерных расчетов запасов проведенных по данным начальной геологоразведки практически полностью совпали с окончательными результатами выработки на этапе завершения отработки месторождения. Тогда как первоначальная оценка запасов по данным геологоразведки традиционными способами показали отклонение порядка 20% с конечными результатами.

Таблица 2– Подсчет запасов по отработанному месторождению

Технологический участок №3	Площадь россыпи, т.м <sup>2</sup>	Запасы, т
Ручной расчет по материалам геологоразведочных работ	84.3	21828
Компьютерный расчет по материалам геологоразведочных работ	74.4	25593
Результаты отработки месторождения	74.8	25723



Таким образом, предлагаемая информационная система позволяет автоматизировать процесс обработки исходных геотехнологических данных, значительно сокращая время анализа и расчета, обеспечивает оперативный доступ к информации необходимой для принятия эффективных управленческих решений, и дает возможность получать дополнительную информацию по месторождению, которая раньше была не доступна в силу сложности и большой трудоемкости ручного расчета. А также позволяет получать более точную оценку запасов и проводить расчеты по подбору оптимальных параметров технологической схемы размещения скважин, обеспечивающее существенное сокращение времени выработки эксплуатационных участков, что позволит значительно снизить потери и затраты на извлечение полезного компонента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных автором исследований была решена актуальная научно-практическая задача по оптимизации технологии СПВ урана путем разработки алгоритмов математического моделирования геотехнологических признаков горного предприятия и создания АИС «Геотехнология» для получения модели в цифровом виде и подбора оптимальных схем расположения технологических скважин.

1 Подземное выщелачивание на сегодняшний день является перспективным, а в ряде случаев экономически выгодным и технически единственно возможным способом добычи урана. Однако его использование сталкивается с рядом трудностей, поскольку процесс протекает в условиях неопределенности информации о недрах, что создает существенные трудности для поиска путей его оптимизации. Физико-химическое моделирование дает возможность исследовать лишь отдельные элементы технологии СПВ. В связи с этим, комплексное изучение таких систем имеет смысл проводить с привлечением методов математического и компьютерного моделирования, однако остаются открытыми вопросы

выбора той или иной модели для описания геотехнологических условий месторождений.

2 Выполненный анализ имеющихся в настоящее время программных средств моделирующих работу добывающего предприятия показал, что, несмотря на использование современных ИТ-технологий по созданию удобного пользовательского интерфейса, работе с базами данных и визуализации высокоуровневой графики, ни одна из предлагаемых систем не соответствует в полной мере требованиям, предъявляемым к информационно-математическому обеспечению. Показано, что математическая база, используемая в предлагаемых программных продуктах, обладает рядом существенных недостатков и не отвечает современным требованиям, что обуславливает необходимость модификации и дополнения существующих методик, используя современные наработки в области статистики и геостатистики.

3 Предложена методика математического моделирования и прогноза геотехнологических показателей добывающего предприятия, отличающаяся от традиционно используемых методов интерполяции, применяемых в настоящее время, универсальной схемой, основанной на построении профильной матричной корреляционной функции в пространстве месторождения по различным направлениям (с заданным шагом) относительно оцениваемой точки (объема) и последующим выявлением области автокорреляции исследуемого атрибутивного признака; выделение закономерной составляющей изменения признака вдоль рассматриваемого направления на фоне случайной посредством построения тренда в пределах области автокорреляции, необходимая степень которого устанавливается на основе принципа самосогласования и последующим расчетом значения признака с помощью модифицированного метода обратных взвешенных расстояний.

4 Проведенные физико-химические исследования закономерностей протекания подземного выщелачивания позволили дать рекомендации по

оптимизации некоторых технологических параметров процесса. Однако, невозможность получения всей информации для принятия комплексных решений по оптимизации с помощью только одного физико-химического моделирования, обусловило необходимость применения математического моделирования и компьютерного эксперимента при анализе геотехнологических параметров процесса СПВ в комплексе.

5 Разработанная на основе полученной модели информационная система, представляющая собой комплекс программ с максимальной автоматизацией расчетов, позволяет принимать решения по планированию и управлению разработкой месторождения путем формирования модели распределения технологических параметров по множеству профилей в планах и разрезах геопространства. И позволяет подбирать оптимальные параметры схемы расположения технологических скважин, что позволит уменьшить время отработки эксплуатационных участков и снизить потери.

6 Построенные с помощью программы цифровые модели эксплуатационных блоков СПВ урана Далматовского месторождения показали преимущество предложенной модели и информационной системы перед традиционными расчетами. А также были продемонстрированы возможности в получении дополнительной информации по месторождению, которая раньше была не доступна в силу сложности и большой трудоемкости ручного расчета, с помощью создания двух- и трехмерные модели рудных залежей.

7 Анализ характеристик полученных математических и компьютерных технологий, и проведенный ретроспективный анализ отработанного месторождения, показали практически полное соответствие требованиям, предъявляемым к информационному обеспечению и моделям добывающих предприятий, что обуславливает возможность их применения для решения задач прогнозирования, управления, оптимизации, интенсификации при отработке месторождения как способом СПВ, так и с использованием традиционных технологий.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:*

1 Антонов В.А. Автоматизированная информационная система оценки интервалов корреляционной связности признаков геотехногенных объектов / В.А. Антонов, А.Б. Уманский, В.М. Аленичев, А.Л. Смирнов, В.Н. Рычков // Горный информационно-аналитический бюллетень, №10, 2008 – с.76-85.

2 Смирнов А.Л. Кинетические закономерности подземного выщелачивания урана из руд гидрогенных месторождений урана / А.Л. Смирнов, В.Н. Рычков, А.Б. Уманский, Е.А. Галянина, А.М. Ключников // Радиохимия, т.51, №1, 2009 – с. 53-55.

3 Рычков В.Н. Перспективы использования искусственных окислителей в процессах подземного сернокислотного выщелачивания / В.Н. Рычков, А.Л. Смирнов, А.М. Ключников, А.Б. Уманский и др. // Известия вузов. Горный журнал, №6, 2009 – с.85-90.

*Статьи, опубликованные в научных сборниках, журналах и материалах конференций:*

4 Уманский А.Б. Математическая модель анализа пространственно-факторной связи геоданных /А.Б. Уманский, А.Л. Смирнов, В.Н. Рычков // Актуальные проблемы урановой промышленности: Материалы IV международной научно-практической конференции. – Алматы, Республика Казахстан: сборник докладов, Алматы, 2006 – с. 305-306.

5 Уманский А.Б. Программный геоинформационный комплекс экспертной оценка минерально-сырьевых и технологических показателей горного предприятия / А.Б. Уманский, А.Л. Смирнов //Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ: сборник статей в 3-х ч., Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007, ч.2 – с. 93-95.

6 Уманский А.Б. Изучение кинетики выщелачивания урана из руд с высокой восстановительной ёмкостью / А.Б. Уманский, Е.А. Галянина,

А.Л. Смирнов //Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ: там же, с. 102-103.

7 Ключников А.М. Пути оптимизации процесса сернокислотного подземного выщелачивания / А.М. Ключников, А.Б. Уманский, А.Л. Смирнов // Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ: там же, с. 103-105.

8 Уманский А.Б. Автоматизированная информационная система обработки и оценки геологических и технологических признаков геотехногенных объектов /А.Б. Уманский, А.Л. Смирнов, В.Н. Рычков // Актуальные проблемы урановой промышленности: Материалы V международной научно-практической конференции. – Алматы, Республика Казахстан: сборник докладов, Алматы, 2008 – с. 266-271.

9 Смирнов А.Л. Исследование кинетических закономерностей выщелачивания урана растворами серной кислоты / А.Л. Смирнов, А.Б. Уманский, В.Н. Рычков // Актуальные проблемы урановой промышленности: Материалы V международной научно-практической конференции. – Алматы, Республика Казахстан: там же, с. 113-120.

10 Аленичев В.М. Построение цифровой модели месторождения с учетом динамической корреляционной связности признаков / В.М. Аленичев, А.Б. Уманский //Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сборник научных трудов, вып. 4/94/ ИГД УрО РАН, Екатеринбург, 2008 – с. 255-261.

11 Уманский А.Б. Исследование влияния Fe(III) на кинетику выщелачивания урана растворами серной кислоты /А.Б. Уманский, А.М. Ключников, А.Л. Смирнов //Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых: сборник статей в 3 Ч. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009, Ч.2 – с.240-243.

12 Ключников А.М. Пути повышения извлечения урана и молибдена при выщелачивании урана из руд / А.М. Ключников, А.Б. Уманский,

А.Л. Смирнов // Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых: там же, с.240-243.

13 Уманский А.Б. Автоматизированная информационная система построения цифровой модели месторождения полезного ископаемого / А.Б. Уманский, В.М. Аленичев, А.Л. Смирнов // Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых: там же, с.235-239.

14 Уманский А.Б. Расчёт по цифровой модели месторождения оптимальных параметров сети технологических скважин при добыче урана способом скважинного подземного выщелачивания / А.Б. Уманский, А.Л. Смирнов, В.М. Аленичев // Научные труды XVIII Международной конференции молодых учёных по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3 Ч. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. Ч.1 – с.351-354.